

УСТОЙЧИВОСТЬ ТИПОВ ДИНАМИКИ ЗЕЛЕННОЙ ФИТОМАССЫ В АЙТУАРСКОЙ СТЕПИ (ЗАПОВЕДНИК «ОРЕНБУРГСКИЙ», ЮЖНЫЙ УРАЛ)

А.В. Хорошев

Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова, географический факультет, Россия, Москва
e-mail: avkh1970@yandex.ru

Исследуется зависимость между пространственной структурой и устойчивостью фитопродукционного функционирования низкогорно-степного ландшафта Айтуарской степи. Выделены 5 типов внутрисезонной динамики зеленой фитомассы, рассчитана мера нестабильности. Ландшафтная структура и размеры бассейна влияют на устойчивость режима фитопродукционного функционирования в наиболее увлажненной его части. Миграция влаги вниз по склону создает внутриурочищные различия в режиме функционирования. Геоциркуляционные механизмы роста нестабильности динамики фитомассы имеют ведущее значение в малых бассейнах площадью до 150 га.

Ключевые слова: фитомасса, NDVI, внутрисезонная динамика, нестабильность, бассейн, структура.

Введение

Одной из ключевых проблем науки о ландшафте становится возможность прогнозирования динамических явлений, диапазона режимов функционирования ландшафта по свойствам его пространственной структуры, т.е. преодоление разрыва между исследованиями пространственной и временной организации. От современного исследователя требуется не просто выявить, как структура влияет на процесс и какие структуры порождаются какими процессами (основной вопрос ландшафтной экологии по [1, 2]), но и объяснить флуктуации в повторяемости и интенсивности процесса. Поскольку важнейшим показателем функционирования ландшафта является биопродуктивность, неслучаен повышенный интерес к индикаторам биопродуктивности, которые можно получить для обширных гетерогенных территорий, а не в отдельных точках, и с наличием временного ряда.

Современные исследования динамики фитопродукционного функционирования основаны преимущественно на расчете вегетационных индексов по многоканальным космическим снимкам. Большинство современных работ сосредоточено на многолетних тенденциях нормализованного разностного вегетационного индекса (NDVI) в связи с климатическими изменениями, обычно с дифференциацией выводов по крупным биомам или типам ландшафтов, или в связи с антропогенными воздействиями [3-5]. Приоритетное значение придается разделению вкладов климатического и антропогенного факторов [6-8, вкладу фактора частоты естественных (например, пожаров) и антропогенных нарушений и оценке эффективности природоохранных мер [9] в динамику фитопродуктивности, индикатором которой выступает NDVI. Большое внимание привлекает различие типов динамики фитомассы в зависимости от состояния почв, особенно их температурного и влажностного режимов; при этом обращается внимание, что реакция разных типов фитоценозов на климатический тренд может существенно различаться, в том числе в связи с почвенно-геологическими контрастами [10]. Обращено внимание, что степень синхронности динамики NDVI в разных видах фитоценозов может варьировать по сезонам [11]. Предметом исследования становится смена видов зависимости между продуктивностью и экологическими факторами от одного временного периода к другому, что может

индцировать скачкообразное изменение внешних условий [12]. Выявлена значимость генезиса литогенной основы ландшафтов засушливых зон для сезонной динамики фитопродуктивности, в том числе для смещения сроков наступления фенологических явлений при климатических изменениях [13]. Отмечается, что проблемой является недостаточная изученность в ландшафтах недостаточного увлажнения влияния гидрологических факторов на фитопродуктивность, по сравнению с обилием информации о влиянии климатических факторов [14, 15]. Вопрос о возможности прогнозировать изменчивость фитопродукционного функционирования по характеристикам пространственной структуры ландшафта остается малоисследованным.

Цель исследования – установить зависимость между пространственной структурой и устойчивостью фитопродукционного функционирования низкогорно-степного ландшафта. Проверяется гипотеза о зависимости изменчивости динамики NDVI от пространственной структуры вышестоящих геосистем.

Материалы и методы

Исследование проведено в низкогорно-типичностепном ландшафте Айтуарской степи в Кувандыкском районе Оренбургской области (участок государственного заповедника «Оренбургский» (рис. 1). Ландшафт представляет собой структурно-эрозионное грядово-балочное низкогорье, сложенное чередующимися пластами песчаников, конгломератов, известняков и алевролитов, с останцами эоценовых поверхностей выравнивания, с петрофитными разнотравно-ковыльно-типчачковыми степями на черноземах южных маломощных сильнокаменистых поверхностно-карбонатных [16]. На фоне доминирующих сообществ в лощинах характерны варианты гидроморфного ряда (луговые степи, кустарники, березово-осиново-черноольховые перелески на черноземах гидрометаморфизированных и темногумусовых почвах), а также литоморфного (на литоземах и петроземах, с большим разнообразием петрофитных вариантов степей [17]) и галоморфного (на солонцах) рядов. Полевые данные обеспечены 216 площадками комплексного ландшафтного описания 10x10 м, заложенных во всех видах урочищ с учетом катенарной организации. Измерение зеленой фитомассы проводилось на 64 площадках размером 0,5x0,5 м в июне 2019 г.

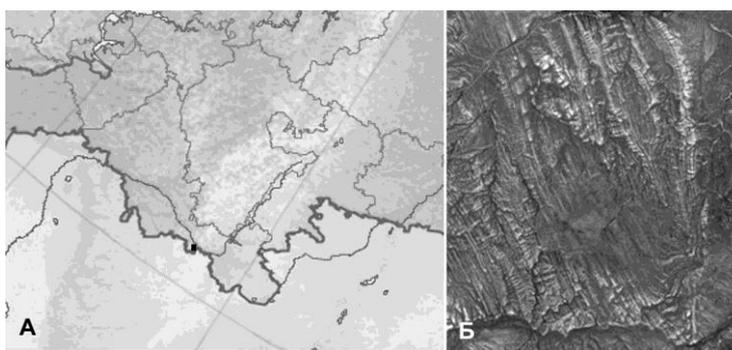


Рисунок 1 – Объект исследования: низкогорно-степной ландшафт Айтуарской степи (Южный Урал. А – географическое положение (обозначено черным квадратом). Б – космический снимок CNES/Airbus

В основе исследования – полиструктурный подход, который позволяет сопоставить значимость вкладов геосистем разного типа (геостационарных, геоциркуляционных, в том числе бассейновых, и биоциркуляционных) и разного иерархического уровня в устойчивость функционирования.

Проверялись гипотезы, что условием стабильности фитопродукционного функционирования являются следующие свойства ландшафтной структуры бассейновой геосистемы (независимые переменные в уравнении, переменные-«предикторы»): а) некоторая критическая пропорция пространственных элементов; б) некоторый критический размер; в) некоторое обязательное соседство. Применялось допущение, что в условиях степного ландшафта с недостаточным увлажнением фитомасса зависит как от локальных свойств фации и урочища, так и от интенсивности поступления влаги со всего водосбора.

Разработанный нами метод оценки стабильности/нестабильности фитопродукционного функционирования описан ранее [18, 19]. Предполагается, что в силу единых для полигона исследования климатических условий за период между любыми двумя сроками в течение вегетационного периода происходит некоторое естественное «фоновое» приращение индекса (с положительным или отрицательным знаком) в большинстве территориальных единиц (в нашем случае – пиксели космического снимка размером 30x30 м). Сравниваются сроки только в пределах одного года. Всего в расчет вошли 33 пары сроков съемки Landsat в 1984-2019 гг., что обеспечивает достоверность выборки для применения статистических методов. Для каждой пары сроков проверяется гипотеза о нормальном распределении приращений или, по крайней мере, наличии модального интервала вблизи среднего значения. Если гипотеза подтверждается, то для каждого пиксела можно определить, подчиняется ли он «фоновой» (модальной) тенденции в интервале $\pm 0,5$ среднеквадратичного отклонения (STD) от среднего либо отклоняется от модального приращения на большую величину ($\pm 0,5-1,5$ STD и $\pm 1,5$ STD и более) в положительную или отрицательную сторону. Каждому пикселу присвоен один из пяти «классов отклонения» для данного срока. Затем для всего множества пар имеющихся сцен космоснимков проверяется гипотеза о стабильности такого «класса отклонения» для каждого пиксела. Например, пиксел может: а) всегда находиться в модальном классе «фоновых» приращений $\pm 0,5$ STD (т.е. функционирует «как большинство» пикселов), б) всегда находиться в одном и том же классе сильных отклонений от большинства, но всегда одинаково (с вариантами классов менее $-1,5$ STD и $-1,5 \dots -0,5$ STD), в) всегда находиться в классе сильных положительных отклонений (с вариантами классов более $+1,5$ STD и $+0,5 \dots +1,5$ STD), г) часто переходить из одного класса отклонений в другой (иногда «как все», иногда «больше других», иногда «меньше других»). Первые три случая (а, б, в) рассматриваются как стабильное функционирование. Последний случай (г) рассматривается как принадлежность пиксела к классу нестабильного функционирования. Мера нестабильности рассчитывается как индекс Шеннона по значениям повторяемости каждого из пяти классов отклонений в долях единицы и их логарифмам. Ниже пять классов отклонений рассматриваются как «*типы динамики зеленой фитомассы*». Рассчитанное значение индекса Шеннона рассматривается как *мера нестабильности типов динамики фитомассы*: чем больше значение, тем выше разнообразие типов динамики. Низкое значение меры нестабильности означает устойчиво высокую повторяемость одного и того же типа динамики, т.е. устойчивую подчиненность факторам либо ландшафтного (при фоновой динамике), либо локального масштаба (при преобладании какого-либо другого типа динамики). Обратим внимание, что речь идет не о стабильных значениях самой зеленой фитомассы (индицируемой NDVI), а о стабильности характера изменений фитомассы во времени.

Для описания варьирования меры нестабильности динамики фитомассы от свойств пространственной структуры ландшафта строились мультирегрессионные модели. Для описания пространственной структуры ландшафта использована концепция В.Н. Солнцева [20], которые предусматривает суперпозицию трех типов структур. Геоциркуляционные структуры формируются однонаправленными гравитационными потоками вещества; в

нашем случае исследовалась зависимость от структуры водосборного бассейна и катены. Геостационарные структуры определяются геолого-геоморфологическим строением либо ближайшей локальной окрестности (уклон, кривизна рельефа урочища, почвообразующая порода), либо группы урочищ (характеристики расчлененности рельефа – топографический позиционный индекс TPI и индекс расчлененности рельефа TRI для окрестностей разного размера, кратного 30 м, – от 90 до 450 м). Биоциркуляционные структуры формируются различиями в обеспеченности солнечной радиацией и, в нашем случае, описываются солярной экспозицией. Все морфометрические характеристики рассчитаны по цифровой модели SRTM (разрешение 30 м после даунскейлинга методом bicubic interpolation) средствами программы SAGA GIS 7.0. Для оценки степени распознавания характеристики динамики NDVI классами экспозиции и гранулометрического состава почв применялся дискриминантный анализ (программа Statistica 7.0).

Для оценки влияния геоциркуляционных структур на устойчивость фитопродукционного функционирования средствами программы Statistica 7.0 построены линейные мультирегрессионные уравнения, в которых зависимой переменной была одна из описательных статистик меры нестабильности динамики фитомассы в бассейне (средняя величина, медиана, верхний и нижний квартили, верхний дециль, среднеквадратическое отклонение, межквартильный диапазон), а независимыми переменными – совокупность аналогичных описательных статистик характеристик аккумуляции влаги в бассейне: характеристики расчлененности рельефа и доли типов фитоценозов. Регрессионные модели построены для 53 водосборов первого-третьего порядков размером от 11 до 298 га с различающимся соотношением типов фитоценозов и форм рельефа. Для сравнимости ландшафтного покрова в каждом бассейне рассчитаны доли 10 типов фитоценозов, полученных при классификации многоканального космического снимка Landsat 8 методом k-средних с полевой верификацией. Затем проведена классификация бассейнов по площадным соотношениям 10 типов фитоценозов, рассчитанных в ГИС ArcMap 3.0. Выделены 4 группы бассейнов. Группа 1 – повышенная доля ковыльных степей и ксеромезофильных кустарников при пониженной доле петрофитных степей. Группа 2 – максимальная доля сухих и петрофитных степей при минимальной доле кустарников и лугов. Группа 3 – повышенная доля сухих и разнотравно-ковыльных степей, ксерофильных кустарников. Группа 4 – высокая доля мезофильных, мезоксерофильных кустарников, лугов, черноольшанников.

Кроме того, для каждого из 53 бассейнов построено мультирегрессионное уравнение (REGMOD), в котором зависимая переменная – мера нестабильности динамики фитомассы (индекс Шеннона) в пикселе, независимые переменные – характеристики аккумуляции влаги (геоциркуляционная система): индекс конвергенции, эрозионный (LS) фактор, относительная позиция на склоне, топографический индекс влажности (TWI), топографический позиционный индекс (TPI, окрестности 90, 330 м), индекс расчлененности рельефа (TRI окрестности 90, 330 м), средний уклон водосбора, площадь водосбора, индекс влажности SAGA.

Результаты и обсуждение

Значения NDVI для периода проведения экспедиции (по снимкам Landsat 8 от 06.06.2019 и 22.06.2019) достоверно коррелируют с влажной зеленой фитомассой с одинаковыми коэффициентами корреляции Спирмена (K) 0,62, что позволяет использовать NDVI как индикатор [18]. Значения коэффициента несколько снижены из-за ослабленной

связи с фитомассой в интервале ее высоких значений, соответствующих мезофитным и ксеромезофитным сообществам с высокой долей кустарников, не попадающих в укос.

По значениям отклонений от фоновой динамики выделены три основных стратегии и пять типов динамики фитопродукционного функционирования (табл. 1). Фоновая стратегия (тип динамики 3) означает умеренное накопление фитомассы от начала мая до конца июня и закономерное ее уменьшение во второй половине лета, что типично для ксерофитных степных сообществ [21]. При этом может быть характерно некоторое повышение зеленой фитомассы в августе, что обычно связывают с деятельностью полукустарничков [13, 22, 23], достаточно характерных для каменистых степей Урала. Вторая группа стратегий (типы динамики 1 и 2) состоит в более интенсивном накоплении фитомассы от почти нулевых значений в начале мая (из-за более позднего снеготаяния и начала вегетации) до конца июня. Третья группа стратегий (типы динамики 4 и 5) объединяет территории с наиболее существенным уменьшением фитомассы в летний период.

Таблица 1 – Стратегии фитопродукционного функционирования сообществ Айтуарской степи

Тип динамики	Стандартное отклонение (STD) от среднего приращения по ландшафту	Характерные типы фитоценозов	Стратегия фитопродукционного функционирования	NDVI начало мая	NDVI конец июня	NDVI конец июля	NDVI конец сентября
1	<-1,5	Разнотравно-кострецовые луга, черноольховые и осиновые заросли лощин и балок	Быстрое накопление весной и почти сохранение летом	0,0-0,1	0,6-0,8	0,5-0,7	0,5-0,7
2	-1,5...-0,5	Грудницево-ковыльно-типчачковые и петрофитные степи крутых каменистых склонов	Быстрое накопление весной и малая потеря летом	0,1-0,2	0,5-0,6	0,3-0,4	0,4-0,6
3	-0,5...0,5	Разнотравно-залесскоковыльные степи плато, пологих и покатых склонов	Умеренное накопление весной и умеренная потеря летом	0,1-0,2	0,4-0,5	0,1-0,2	0,2-0,4
4	0,5...1,5	Кустарниковые типчачково-ковыльковые и типчачковые степи покатых и крутых верхних частей склонов	Умеренное накопление весной и большая потеря летом	0,1-0,2	0,5-0,6	0,1-0,2	0,3-0,4
5	>1,5	Разнотравно-ковыльно-кострецовые степи, кустарники водосборных понижений	Быстрое накопление весной и большая потеря летом	0,0-0,1	0,7-0,8	0,2-0,3	0,2-0,3

Выявлена зависимость фитопродукционного функционирования от характера рельефа соседних урочищ. Наиболее заметно она проявляется в сообществах днищ лощин и балок (кустарниковые заросли из вишни, спиреи, миндаля; мезофитные кострцовые луга, ксеромезофитные степи). Для таких местообитаний характерна четко выраженная фациальная и фитоценотическая мозаичность [24]. Рост расчлененности рельефа (TRI) в целом увеличивает для этих сообществ повторяемость стратегии быстрого накопления и сохранения фитомассы, снижает повторяемость фоновой динамики. При этом более существенна расчлененность в ближайшей окрестности (90 м), чем в дальней (450 м). Степень вогнутости (по TRI), наоборот, более значима в дальней окрестности 450 м, чем в ближней 90 м: чем больше вогнутость, тем больше повторяемость отрицательных отклонений (внутрисезонной устойчивости) и меньше повторяемость фоновой динамики. Это означает наличие двух масштабных уровней процессов, влияющих на стабильность фитопродукционного функционирования: аккумуляция влаги в крупных вогнутых формах рельефа (лощины, балки) и дополнительное действие узколокального фактора притока влаги в узких крутосклонных секторах лощин и балок. В таких секторах балок накапливается повышенное количество снега, что отражается на постоянно повышенном летнем запасе влаги, поддерживающем устойчивую фитомассу.

Зависимости внутрисезонной динамики фитомассы от площади водосбора характерна для группы склоновых урочищ. Наибольшая повторяемость фоновых приращений фитомассы (более 80%) и, соответственно, высокая стабильность динамики встречается только в верхних частях склонов при минимальном значении эрозионного (LS) фактора. При этом местами встречаются и фации с низкой стабильностью. По мере возрастания площади водосбора и эрозионного индекса к нижней части склонов разнообразие вариантов динамики фитомассы возрастает; стабильная динамика исключается (рис. 2). Следовательно, гециркуляционная организация на склонах более существенна для временной организации, чем геостационарная: при прочих равных геолого-геоморфологических условиях миграция влаги вниз по склону (увеличение площади водосбора) создает внутриурочищные различия в режиме функционирования. Фактически по фитопродукционному функционированию нижние части склонового урочища непостоянно составляют единое целое с остальными фациями урочища и, время от времени, накапливают или теряют фитомассу синхронно с соседним урочищем днища лощины.

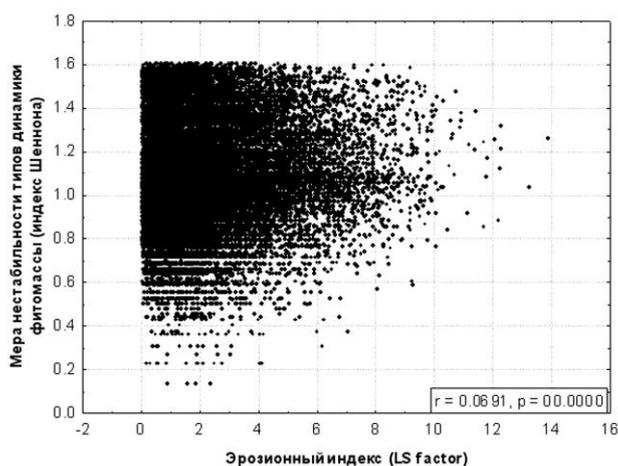


Рисунок 2 – Зависимость меры нестабильности типов динамики зеленой фитомассы от эрозионного индекса для склоновых урочищ Айтуарской степи

Была проверена гипотеза, что пространственное варьирование фитопродукционного функционирования в пределах водосборного бассейна можно объяснить совокупностью геоциркуляционных морфометрических характеристик рельефа, а теснота связи определяется ландшафтной структурой бассейна.

Оказалось, что коэффициент детерминации мультирегрессионного уравнения REGMOD (рис. 3), связывающего меру нестабильности динамики фитомассы с морфометрическими характеристиками геоциркуляционной системы, уменьшается по мере роста площади бассейна (рис. 4). Это означает, что геоциркуляционные механизмы накопления влаги и соответствующего роста нестабильности динамики фитомассы имеют ведущее значение в малых бассейнах площадью до 150 га (1-2 порядка). В более крупных бассейнах либо происходит наложение большого количества взаимокомпенсирующих механизмов, либо виды зависимости неодинаковы в пространстве. Второй случай требует отдельного исследования с применением метода географически взвешенной регрессии. В малых бассейнах, дренирующих наиболее слаборасчлененную южную часть ландшафта (плато Актобе), вклад геоциркуляционных структур в динамику фитомассы ослаблен, по сравнению с глубокорасчлененной частью. Из крупных бассейнов наиболее высокий вклад геоциркуляционных структур в динамику фитопродукционного функционирования наблюдается в бассейнах трех балок с наиболее высокими пастбищными нагрузками (буферная зона заповедника в северной части территории). По мере возрастания расчлененности рельефа бассейна увеличивается вклад топографического индекса влажности (TWI) в варьирование меры нестабильности динамики фитомассы. Следовательно, в наиболее расчлененных бассейнах, дестабилизирующее влияние варьирующего притока влаги на динамику фитомассы целиком определяется ее гравитационным перемещением.

В менее расчлененных бассейнах устойчивость фитопродукционного функционирования часто определяется другими факторами. Например, частое чередование диагональных или субвертикальных пластов песчаников, конгломератов и известняков обуславливает неодинаковую каменистость и мощность почв и их разную водопроницаемость. В частности, на водопроницаемых конгломератах фоновая динамика повторяется несколько реже (в среднем 39 %), чем на песчаниках и известняках (46 %): характерные петрофитные фитоценозы имеют стабильно малую фитомассу. В сухих и петрофитных степях наиболее стабильная динамика отмечена на песчаниках. Несколько повышена нестабильность динамики фитомассы на суглинистых почвах, по сравнению с более легкими почвами. Методом дискриминантного анализа установлено, что корректность распознавания совокупности динамических характеристик 3 классами гранулометрического состава составляет 43 %. Более тяжелые почвы увеличивают чувствительность к экстремальным погодным условиям. Во влажные годы влага хорошо задерживается гумусированными суглинками, фитомасса растет; в сухие – сильнее испаряется, фитомасса падает существенно сильнее, чем в фоновых условиях. Таким образом, динамика фитомассы формируется под совместным влиянием геоциркуляционных и геостационарных ландшафтных структур.

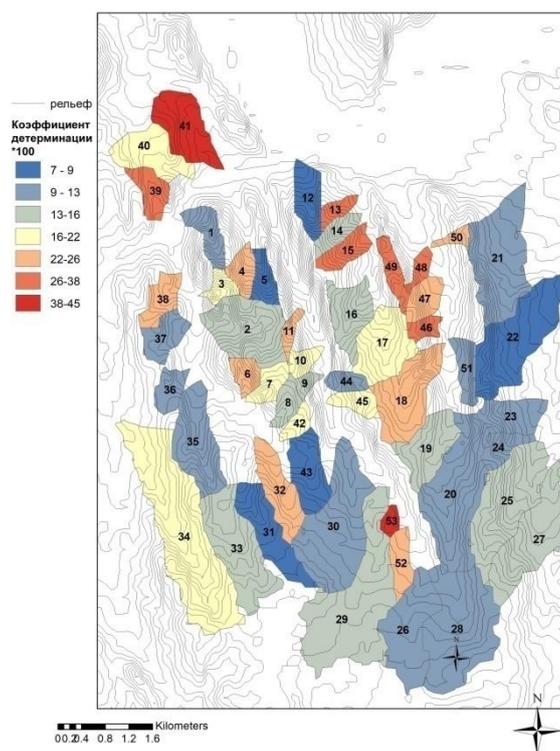


Рисунок 3 – Доля объясненной дисперсии (%) мультирегрессионного уравнения REGMOD, где зависимая переменная – мера нестабильности (индекс Шеннона) типов динамики NDVI, независимые переменные – морфометрические характеристики рельефа, для 53 модельных водосборных бассейнов

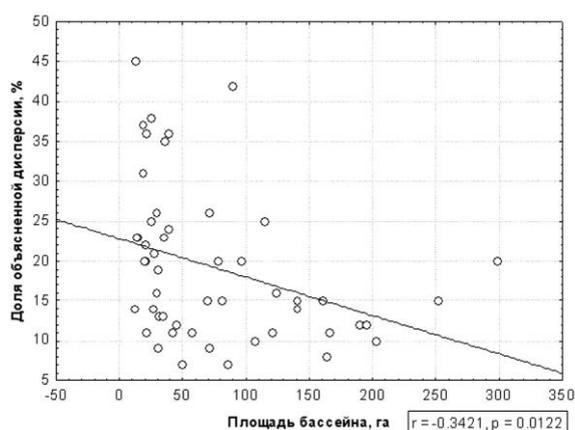


Рисунок 4 – Коэффициент детерминации мультирегрессионного уравнения REGMOD (метод прямого пошагового выбора, $F=1$), в котором зависимая переменная – мера нестабильности динамики фитомассы (33 пары сроков), независимые переменные – морфометрические характеристики аккумуляции влаги (геоциркуляционной системы)

Затем проверялась гипотеза о зависимости устойчивости фитопродукционного функционирования от структуры растительного покрова бассейна. Поскольку пиковые значения нестабильности обычно достигаются в днищах лощин и балок, предполагалось, что они зависят от интенсивности разгрузки грунтовых вод, а их обилие, в свою очередь, определяется общим запасом влаги в почвах бассейна. Очевидно, что высокая доля сухостепных и петрофитных фитоценозов свидетельствует о небольших запасах влаги в

бассейне. С повышением доли луговостепных фитоценозов должна возрастать и нестабильность динамики фитомассы в зонах разгрузки.

Наиболее высокие коэффициенты детерминации до 0,3-0,45 (рис. 4) свойственны бассейнам 2-го класса ландшафтного покрова – с максимальной долей сухих и петрофитных степей (рис. 5). В бассейнах с площадью более 45 га повышение доли сухих степей приводит к понижению нижней границы верхнего дециля (число, которое превышает 10 % наблюдений) меры нестабильности типов динамики зеленой фитомассы (рис. 6а). Это трактуется как следствие слабого концентрирования влаги и слабой ее разгрузки в тальвеге, что способствует более частому подчинению динамики фоновым условиям. Притальвеговые фации в «засушливом» бассейне наращивают или теряют надземную фитомассу примерно так же, как склоновые, подчиняясь общим для ландшафта внутрисезонным погодным тенденциям. Иначе говоря, если в бассейне много сухих степей, то наиболее нестабильные и наиболее влагообеспеченные его фации (как правило, вдоль тальвега) более стабильны по динамике фитомассы, чем в других бассейнах. В малых бассейнах с площадью менее 45 га аналогичную роль (повышение повторяемости фоновой динамики) играет доля ковыльно-типчаковых степей (рис. 6б). При повышенной доле типичностепных и луговостепных фитоценозов чаще проявляются «негеоциркуляционные» механизмы устойчивости функционирования (локальные почвенные, геологические факторы) либо проявляется смена видов зависимости в пространстве бассейнов.

Таким образом, соотношение типов фитоценозов в бассейне как индикатор запасов влаги существенно влияет на величину пиковых (для бассейна) значений нестабильности динамики фитомассы.

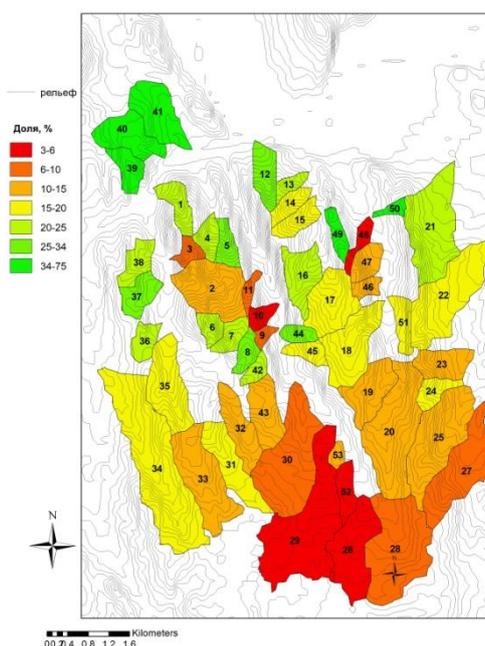


Рисунок 5 – Встречаемость грудницево-ковыльно-типчаковых и петрофитных степей, % от площади водосборного бассейна

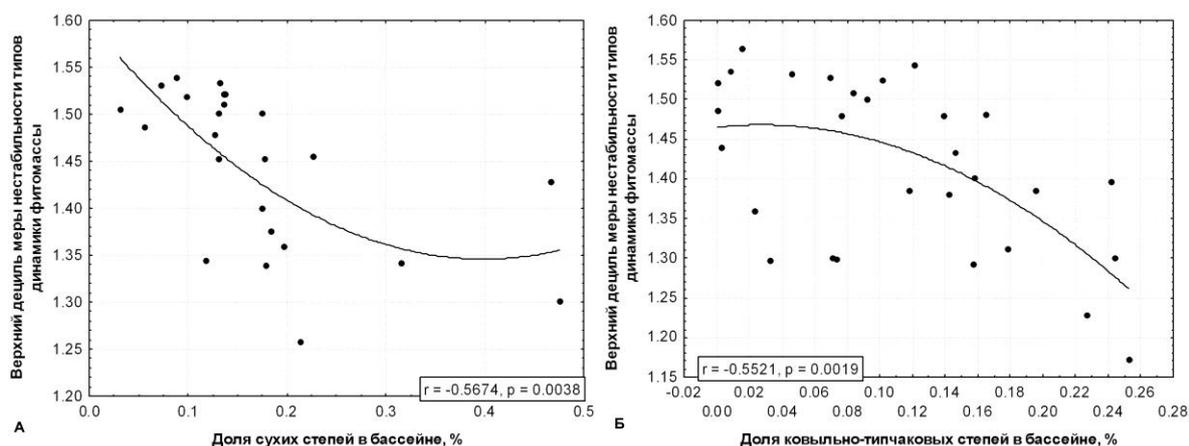


Рисунок 6 – Верхний дециль (число, которое превышает 10 % наблюдений) меры нестабильности типов динамики зеленой фитомассы в зависимости от: А) доли сухих степей в бассейне при площади бассейна более 45 га, Б) доли ковыльно-типчаковых степей в бассейне при площади бассейна менее 45 га

Для водосборов 1-го порядка на склонах и в эрозионных формах рельефа рост площади степных фитоценозов в окрестности пиксела радиусом 210 м сопровождается снижением значимости локальных факторов и повторяемости стратегии медленного накопления и быстрой потери фитомассы. Одновременно растет подчиненность факторам общеландшафтного масштаба и повторяемости фоновой динамики. При небольшой доле степей и соседстве с петрофитными сообществами или лугами повторяемость такой стратегии превышает повторяемость фоновой динамики. В эрозионных формах рост доли степей в окрестности сопровождается снижением повторяемости стратегии быстрого накопления и сохранения фитомассы, по сравнению с фоновой общеландшафтной динамикой. Иными словами, луговые и лугостепные сообщества в окружении себе подобных чаще подчиняются обычной для себя стратегии динамики фитомассы, чем в окружении степей.

Установлена зависимость стабильности динамики фитомассы от ландшафтного разнообразия. Для этого использовались регрессионные модели, где независимой переменной был индекс доминирования, рассчитанный по встречаемости типов фитоценозов в окрестности с радиусом 210 м (7-кратный размер пиксела). В типичностепных фитоценозах на широких субгоризонтальных поверхностях рост разнообразия растительного покрова сопровождается ростом нестабильности, ростом повторяемости сохранения максимальной поздневесенне-раннелетней фитомассы (тип 1), снижением повторяемости сильной летней потери фитомассы (тип 4).

Методом дискриминантного анализа установлена подчиненность фитопродукционного функционирования биоциркуляционным структурам. Распознавание совокупности динамических характеристик 4 классами солярной экспозиции (север, восток, юг, запад) составляет 40 %. При этом наиболее своеобразным режимом фитопродукционного функционирования обладают урочища южных экспозиций (корректность распознавания – 64 %). Для них характерна повышенная нестабильность типов динамики и пониженная повторяемость фоновой динамики (тип 3). При этом относительная стабильность фитомассы летом (в отличие от ее падения в фоновых условиях) связана с преобладанием устойчивых к засухе петрофильных видов с малой фитомассой.

Выводы

1. Фитопродукционное функционирование низкогорно-степного ландшафта складывается из наложения действия геостационарных, геоциркуляционных и биоциркуляционных структур.
2. Ландшафтная структура и размеры бассейна влияют на устойчивость режима фитопродукционного функционирования в наиболее увлажненной его части. Рост доли сухостепных и петрофитных фитоценозов сопровождается ростом повторяемости фоновой динамики ландшафтного масштаба в днищах лощин и балок.
3. При прочих равных геолого-геоморфологических условиях миграция влаги вниз по склону (увеличение площади водосбора) создает внутриурочищные различия в режиме функционирования. Нижние части склонов могут в зависимости от погодных условий конкретного года синхронизировать режим фитопродукционного функционирования либо с верхней частью склона, либо с днищем лощины или балки.
4. Геоциркуляционные механизмы накопления влаги и соответствующего роста нестабильности динамики фитомассы имеют ведущее значение в малых бассейнах площадью до 150 га. В крупных бассейнах более существенны взаимокомпенсирующие эффекты наложения типов ландшафтных структур.
5. На почвах с наиболее низкой водопроницаемостью уменьшается повторяемость фоновой динамики фитомассы и растет чувствительность к погодным колебаниям. На почвах, сформировавшихся на породах максимальной водопроницаемости, вклад локальных факторов, стабилизирующих динамику фитомассы, превышает вклад факторов ландшафтного масштаба.
6. Для фитоценозов гидроморфного ряда рельефа рост площади степных фитоценозов в окрестности сопровождается снижением значимости локальных факторов и ростом подчиненности факторов ландшафтного масштаба и повторяемости фоновой динамики. Высокая мозаичность растительного покрова способствует росту нестабильности типов динамики фитомассы.

Благодарности

Исследование выполнено при финансовой поддержке Российского фонда фундаментальных исследований (проект 20-05-00464). Автор выражает благодарность Д.Е. Шаровой, И.В. Воловинскому, О.М. Подгорному за участие в сборе и первичной обработке полевых данных.

Список литературы

1. Turner M.G., Gardner, R.H. Landscape ecology in theory and practice. Pattern and process. New York: Springer, 2015. 482 p.
2. Antrop M., van Eetvelde V. Landscape Perspectives: The Holistic Nature of Landscape. Springer, Dordrecht, 2017. 436 p.
3. Turner D., Clarke K., Lewis M., Ostendorf B. Using NDVI dynamics as an indicator of native vegetation management in a heterogeneous and highly fragmented landscape. In: Piantadosi J., Anderssen R.S., Boland J. (Eds.) MODSIM. 2013. pp. 1931-1937.
4. Bobkov A., Panidi E., Torloпова N., Tsepelev V. NDVI dynamics of the taiga zone in connection with modern climate changes. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS Archives). 2015. pp. 157-163. DOI:10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-157-2015.
5. Содномов Б.В., Аюржанаев А.А., Цыдыпов Б.З., Гармаев Е.Ж. Алгоритм оценки долговременных вариаций MODIS NDVI // Журнал Сибирского Федерального университета. Серия Техника. Технологии. 2018. № 11 (1). С. 61-68. DOI: 10.17516 / 1999-494X-0009.

6. Kang C.H., Zhang Y.L., Wang Z., Liu L., Zhang H., Jo Y. The driving force analysis of NDVI dynamics in the trans-boundary Tumen river basin between 2000 and 2015. *Sustainability*. 2017. vol. 9. no. 2350. DOI:10.3390/su9122350.
7. Ayurzhanaev A.A., Sodnomov B.V., Garmaev E.Zh., Tsydypov B.Z., Andreev S.G., Alymbaeva Zh.B., Tulokhonov A.K. Long-term NDVI dynamics in the basin of Lake Baikal. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2018. vol. 211. no. 012041 DOI:10.1088/1755-1315/211/1/012041.
8. Ерошенко Ф.В., Барталев С.А., Лапенко Н.Г., Самофал Е.В., Сторчак И.Г. Возможности дистанционной оценки состояния и степени деградации природных кормовых угодий // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2018. т. 15. № 7. С. 53-66. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-53-66.
9. Santana N.K. Fire recurrence and normalized difference vegetation index (NDVI) dynamics in Brazilian savanna. *Fire*. vol. 2. no. 1. DOI:10.3390/fire2010001.
10. Lin X., Niu J., Berndtsson R., Yu X., Zhang L., Chen X. NDVI dynamics and its response to climate change and reforestation in Northern China. *Remote Sensing* 2020. vol. 12. no. 4138. DOI:10.3390/rs12244138.
11. Иванова К. В. Динамика индекса NDVI для разных классов территориальных единиц растительности типичных тундр // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2019. Т. 16. № 5. С. 194-202. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-194-202.
12. Piao S.L., Nan H.J., Huntingford C., Ciais P., Friedingstein P., Sitch S., Peng S.S., Ahlstrom A., Canadell J.G., Cong N., Levis S., Levy P.E., Liu L.L., Lomas M.R., Mao J.F., Myneni R.B., Peylin P., Poulter B., Shi X.Y., Yin G.D., Viovy N., Wang T., Wang X.H., Zaehle S., Zeng N., Zeng Z.Z., Chen A.P. Evidence for a weakening relationship between interannual temperature variability and northern vegetation activity. 2014. *Nat. Commun.* vol. 5. no. 5018.
13. Шинкаренко С.С., Барталев С.А. Сезонная динамика NDVI пастбищных ландшафтов Северного Прикаспия по данным MODIS // *Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса*. 2020. Т. 17. № 4. С. 179-194. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-179-194.
14. Fu B., Burgher I. Riparian vegetation NDVI dynamics and its relationship with climate, surface water and groundwater. *Journal of arid environments*. 2015. vol. 113. pp. 59-68. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2014.09.010.
15. Rahetlah V. B., Salgado P., Andrianarisoa B., Tillard E., Razafindrazaka H., Le Mézo L., Ramalanjaona V. L. Relationship between normalized difference vegetation index (NDVI) and forage biomass yield in the Vakinankaratra region, Madagascar. *Livestock Research for Rural Development*. 2014. vol. 26. no. 5, pp. 1-11.
16. Хорошев А.В. Ландшафтная структура Айтуарской степи (заповедник «Оренбургский») и экологические ряды урочищ // *Проблемы географии Урала и сопредельных территорий*. Челябинск: Край Ра, 2016. С. 210-216.
17. Калмыкова О.Г. О растительном покрове госзаповедника «Оренбургский» // *Известия Самарского научного центра Российской академии наук*. 2012. Т. 14. № 1-4. С. 1024-1026.
18. Хорошев А. В. Пространственная структура как фактор стабильности биопродукционного функционирования степных геосистем (на примере Айтуарской степи, Южный Урал) // *Принципы экологии*. 2020. Т. 9. № 3. С. 71-86.
19. Хорошев А.В. Ландшафтные условия стабильности фитопродукционного функционирования в Айтуарской Степи (Южный Урал) // *Вестник Московского университета. Серия 5. География*. 2021. № 2. С. 82-91.
20. Солнцев В.Н. Структурное ландшафтоведение: основы концепции. Некоторые аргументы. М., 1997. 12 с.
21. Титлянова А.А., Базилевич Н.И., Шмакова Е.И., Снытко В.А., Дубынина С.С., Магомедова Л.Н., Нефедьева Л.Г., Семенюк Н. В., Тишков А.А., Ти Тран, Хакимзянова Ф.И.,

Шатохина Н.Г., Кыргыз Ч.О., Самбуу А.Д. Биологическая продуктивность травяных экосистем. Географические закономерности и экологические особенности. Новосибирск: ИПА СО РАН, 2018. 110 с.

22. Дусаева Г.Х., МаксUTOва Н.В., Калмыкова О.Г. Сезонная динамика надземной фитомассы разнотравно-овсецово-типчаково-залесскоковыльного сообщества // Сохранение разнообразия растительного мира Тувы и сопредельных регионов Центральной Азии: история, современность, перспективы. Кызыл: Тувинский институт комплексного освоения природных ресурсов Сибирского отделения Российской Академии наук, 2016. С. 67-69.

23. Рулев А. С., Канищев С. Н., Шинкаренко С. С. Анализ сезонной динамики NDVI естественной растительности Заволжья Волгоградской области // Современные проблемы дистанционного зондирования Земли из космоса. 2016. Т. 13. № 4. С. 113-123.

24. Сивохиц Ж.Т., Калмыкова О.Г. Краткий анализ пространственной организации ручьевых комплексов низкогорных ландшафтов Оренбургской области // Вестник ВГУ. Серия: География. Геоэкология. 2008. № 1. С. 16-20.

Конфликт интересов: Автор декларирует отсутствие явных и потенциальных конфликтов интересов, связанных с публикацией настоящей статьи.

Поступила в редакцию 25.01.2021

Принята к публикации 22.03.2021

STABILITY OF DYNAMICS TYPES OF GREEN PHYTOMASS IN THE AITUAR STEPPE (ORENBURGSKY RESERVE, THE SOUTHERN URALS)

A. Khoroshev

Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography, Russia, Moscow
e-mail: avkh1970@yandex.ru

The research focuses on the relationship between the spatial structure and the stability of the phytoproduction functioning in the low-mountainous steppe landscape of the Aituar steppe. We distinguished five types of intraseasonal dynamics of green phytomass and calculated the Shannon index as an indicator of dynamics instability. The landscape structure and basin sized affect the stability of the phytoproductive functioning regime in the most humid part of a catchment. Moisture downslope migration generates spatial differences in the functioning within a landscape units. Geocirculatory mechanisms of the growth of phytomass dynamics instability are of leading importance in small basins with an area of up to 150 hectares.

Key words: phytomass, NDVI, intraseasonal dynamics, instability, basin, structure.

References

1. Turner M.G., Gardner, R.H. Landscape ecology in theory and practice. Pattern and process. New York: Springer, 2015. 482 p.
2. Antrop M., van Eetvelde V. Landscape Perspectives: The Holistic Nature of Landscape. Springer, Dordrecht, 2017. 436 p.
3. Turner D., Clarke K., Lewis M., Ostendorf B. Using NDVI dynamics as an indicator of native vegetation management in a heterogeneous and highly fragmented landscape. In: Piantadosi J., Anderssen R.S., Boland J. (Eds.) MODSIM. 2013. pp. 1931-1937.
4. Bobkov A., Panidi E., Torlopova N., Tsepelev V. NDVI dynamics of the taiga zone in connection with modern climate changes. International Archives of the Photogrammetry, Remote Sensing and Spatial Information Sciences (ISPRS Archives). 2015. pp. 157-163. DOI:10.5194/isprsarchives-XL-7-W3-157-2015.
5. Sodnomov B.V., Ayurzhanayev A.A., Tsydyrov B.Z., Garmayev E.Zh. Algoritm otsenki dolgovremennykh variatsii MODIS NDVI. Zhurnal Sibirskogo Federal'nogo universiteta. Seriya Tekhnika. Tekhnologii. 2018. N 11 (1). S. 61-68. DOI: 10.17516 / 1999-494X-0009.

6. Kang C.H., Zhang Y.L., Wang Z., Liu L., Zhang H., Jo Y. The driving force analysis of NDVI dynamics in the trans-boundary Tumen river basin between 2000 and 2015. *Sustainability*. 2017. vol. 9. no. 2350. DOI:10.3390/su9122350.
7. Ayurzhanaev A.A., Sodnomov B.V., Garmaev E.Zh., Tsydypov B.Z., Andreev S.G., Alymbaeva Zh.B., Tulokhonov A.K. Long-term NDVI dynamics in the basin of Lake Baikal. *IOP Conf. Series: Earth and Environmental Science*. 2018. vol. 211. no. 012041 DOI:10.1088/1755-1315/211/1/012041.
8. Eroshenko F.V., Bartalev S.A., Lapenko N.G., Samofal E.V., Storchak I.G. Vozmozhnosti distantsionnoi otsenki sostoyaniya i stepeni degradatsii prirodnykh kormovykh ugodii. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2018. t. 15. N 7. S. 53-66. DOI: 10.21046/2070-7401-2018-15-7-53-66.
9. Santana N.K. Fire recurrence and normalized difference vegetation index (NDVI) dynamics in Brazilian savanna. *Fire*. vol. 2. no. 1. DOI:10.3390/fire2010001.
10. Lin X., Niu J., Berndtsson R., Yu X., Zhang L., Chen X. NDVI dynamics and its response to climate change and reforestation in Northern China. *Remote Sensing* 2020. vol. 12. no. 4138. DOI:10.3390/rs12244138.
11. Ivanova K. V. Dinamika indeksa NDVI dlya raznykh klassov territorial'nykh edinit rastitel'nosti tipichnykh tundr. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2019. Vol. 16. N 5. S. 194-202. DOI: 10.21046/2070-7401-2019-16-5-194-202.
12. Piao S.L., Nan H.J., Huntingford C., Ciais P., Friedingstein P., Sitch S., Peng S.S., Ahlstrom A., Canadell J.G., Cong N., Levis S., Levy P.E., Liu L.L., Lomas M.R., Mao J.F., Myneni R.B., Peylin P., Poulter B., Shi X.Y., Yin G.D., Viovy N., Wang T., Wang X.H., Zaehle S., Zeng N., Zeng Z.Z., Chen A.P. Evidence for a weakening relationship between interannual temperature variability and northern vegetation activity. 2014. *Nat. Commun.* vol. 5. no. 5018.
13. Shinkarenko S.S., Bartalev S.A. Sezonnaya dinamika NDVI pastbishchnykh landshaftov Severnogo Prikaspiya po dannym MODIS. *Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa*. 2020. Vol. 17. N 4. S. 179-194. DOI: 10.21046/2070-7401-2020-17-4-179-194.
14. Fu B., Burgher I. Riparian vegetation NDVI dynamics and its relationship with climate, surface water and groundwater. *Journal of arid environments*. 2015. vol. 113. pp. 59-68. DOI: 10.1016/j.jaridenv.2014.09.010.
15. Rahetlah V. B., Salgado P., Andrianarisoa B., Tillard E., Razafindrazaka H., Le Mézo L., Ramalanjaona V. L. Relationship between normalized difference vegetation index (NDVI) and forage biomass yield in the Vakinankaratra region, Madagascar. *Livestock Research for Rural Development*. 2014. vol. 26. no. 5, pp. 1-11.
16. Khoroshev A.V. Landshaftnaya struktura Aituarskoi stepi (zapovednik «Orenburgskii») i ekologicheskie ryady urochishch. *Problemy geografii Urala i sopredel'nykh territorii*. Chelyabinsk: Krai Ra, 2016. S. 210-216.
17. Kalmykova O.G. O rastitel'nom pokrove goszapovednika «Orenburgskii». *Izvestiya Samarskogo nauchnogo tsentra Rossiiskoi akademii nauk*. 2012. Vol. 14. N 1-4. S. 1024-1026.
18. Khoroshev A. V. Prostranstvennaya struktura kak faktor stabil'nosti bioproduktsionnogo funktsionirovaniya stepnykh geosistem (na primere Aituarskoi stepi, Yuzhnyi Ural). *Printsipy ekologii*. 2020. Vol. 9. n 3. S. 71-86.
19. Khoroshev A.V. Landshaftnye usloviya stabil'nosti fitoproduktsionnogo funktsionirovaniya v Aituarskoi Step (Yuzhnyi Ural) // *Vestnik Moskovskogo universiteta. Seriya 5. Geografiya*. 2021. N 2. S. 82-91.
20. Solntsev V.N. *Strukturnoe landshaftovedenie: osnovy kontseptsii*. Nekotorye argumenty. M., 1997. 12 s.
21. Titlyanova A.A., Bazilevich N.I., Shmakova E.I., Snytko V.A., Dubynina S.S., Magomedova L.N., Nefed'eva L.G., Semenyuk N. V., Tishkov A.A., Ti Tran, Khakimzyanova F.I., Shatokhina N.G., Kyrgys Ch.O., Sambuu A.D. *Biologicheskaya produktivnost' travyanykh*

ekosistem. Geograficheskie zakonomernosti i ekologicheskie osobennosti. Novosibirsk: IPA SO RAN, 2018. 110 s.

22. Dusaeva G.Kh., Maksutova N.V., Kalmykova O.G. Sezonnaya dinamika nadzemnoi fitomassy raznotravno-ovsetsovo-tipchakovo-zalesskokovyl'nogo soobshchestva. Sokhranenie raznoobraziya rastitel'nogo mira Tuvy i sopredel'nykh regionov Tsentral'noi Azii: istoriya, sovremennost', perspektivy. Kyzyl: Tuvinskii institut kompleksnogo osvoeniya prirodnykh resursov Sibirskogo otdeleniya Rossiiskoi Akademii nauk, 2016. S. 67-69.

23. Rulev A. S., Kanishchev S. N., Shinkarenko S. S. Analiz sezonnoi dinamiki NDVI estestvennoi rastitel'nosti Zavolzh'ya Volgogradskoi oblasti. Sovremennye problemy distantsionnogo zondirovaniya Zemli iz kosmosa. 2016. Vol. 13. N 4. S. 113-123.

24. Sivokhip Zh.T., Kalmykova O.G. Kratkii analiz prostranstvennoi organizatsii ruch'evykh kompleksov nizkogornykh landshaftov Orenburgskoi oblasti. Vestnik VGU. Seriya: Geografiya. Geoekologiya. 2008. N 1. S. 16-20.

Сведения об авторах

Александр Владимирович Хорошев

Доктор географических наук, доцент, профессор Московского государственного университета имени М.В. Ломоносова, географический факультет.

ORCID 0000-0001-5254-2651

Alexander Khoroshev

Doctor of geographical sciences, associate professor, professor, Lomonosov Moscow State University, Faculty of Geography.

Для цитирования: Хорошев А.В. Устойчивость типов динамики зеленой фитомассы в Айтуарской степи (заповедник «Оренбургский», Южный Урал) // Вопросы степеведения. – 2021. – № 1. – С. 68-82. DOI: 10.24412/2712-8628-2021-1-68-82